

一种高电场激励效率的石英谐振元件设计

林丙涛^{1,2,3}, 林日乐^{1,2,3}, 林朝营⁴, 赵建华^{1,2,3}, 李文蕴^{1,2,3}

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060; 2. 重庆市固态惯性技术企业工程技术研究中心, 重庆 401332;

3. 重庆市固态惯性技术工程实验室, 重庆 401332; 4. 重庆通信学院, 重庆 400035)

摘要:设计了一种谐振梁为双“W”截面形状的石英音叉谐振元件, 通过在梁表面凹槽的两端设置深凹槽, 有效提高了凹槽侧壁的陡直性, 进而提高了电场的激励效率。经仿真对比, 相对于“H”形截面的谐振元件, 双“W”形截面的谐振元件的压电激励力提高约 58%。设计了元件芯片工艺方案, 并在直径 $\varnothing 50$ cm 的晶片上制作出两种截面形状的谐振元件。测试结果表明, 双“W”形截面的谐振元件的品质因数(Q)值和导纳分别由 2 387、2 143 ns 提高至 2 648、2 346 ns, 动态阻抗值由 548 k Ω 降至 417 k Ω 。

关键词:石英; 谐振器; 凹槽; 电场激励效率; 动态阻抗; 品质因数(Q)

中图分类号: TN384; TN75; TP212 **文献标识码:** A

Design of Quartz Resonator With High Electric Field Excitation Efficiency

LIN Bingtao^{1,2,3}, LIN Rile^{1,2,3}, LIN Chaoying⁴, ZHAO Jianhua^{1,2,3}, LI Wenyun^{1,2,3}

(1. 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. Solid Inertial Technology Enterprise Engineering Technology Research Center of Chongqing City, Chongqing 401332, China;

3. Solid Inertial Technology Engineering Laboratory of Chongqing City, Chongqing 401332, China;

4. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: According to the anisotropic etching characteristics of quartz crystal, a novel micro-resonator with two double W-shaped cross-section beams was designed. The side well gradient was improved by setting two deep grooves on both sides of the grooves to improve the electric field excitation efficiency. The simulation result showed that the piezoelectric force was improved by 58% comparing to the resonator with two H-shaped cross-section beams. Two kinds of resonators were successfully manufactured on a quartz crystal wafer with diameter of $\varnothing 50$ cm. The experimental results showed that the Q factor and admittance of the new resonator were increased from 2 387、2 143 ns to 2 648、2 346 ns, respectively, and the motional impedance was decreased from 548 k Ω to 417 k Ω .

Key words: quartz; resonator; groove; electric field excitation efficiency; motional impedance; Q factor

0 引言

微型谐振器作为一种输出固定频率的器件, 广泛应用于多个领域。谐振元件是谐振器的核心元件, 其尺寸大小及性能将直接决定谐振器的尺寸及性能。石英晶体材料^[1]的品质因数(Q)高、温度稳定性好, 可采用微加工工艺加工, 常作为高温度稳定性谐振元件的基体材料。随着小型化趋势的发展, 石英谐振元件尺寸不断减小, 其谐振时的动态阻抗值随之增加, Q下降, 功耗增大。

为降低微型石英谐振元件的动态阻抗值, 提高电场激励效率, 日本 Epson 公司^[2]设计了一种“H”形截面谐振梁结构的音叉式石英谐振元件。通过在

谐振梁内部设置凹槽, 提高了谐振梁内部的激励电场强度和电极激励效率, 缩小了元件的尺寸; 此外, 通过去除凹槽底面的电极膜层, 有效降低了谐振梁工作于谐振模态时左右两端的热量流动, 进一步提高了谐振品质因数。

石英晶体的刻蚀主要有干法^[3]和湿法^[4-5]两种方式。湿法刻蚀成本低, 石英基微器件的加工多采用湿法刻蚀工艺。由于石英晶体存在各向异性, “H”形截面谐振梁内的凹槽截面为多个晶面组成的多边形形状^[6], 而非理想的矩形形状, 导致凹槽侧壁陡直性差, 且单个谐振梁的左右两端的对称性较差, 电场强度的提升幅度有限, 谐振元件的谐振稳定性不高。

收稿日期: 2016-01-29

基金项目: 重庆市青年科技人才培养计划基金资助项目(cstc2014kjrc-qncr40003)

作者简介: 林丙涛(1982-), 男, 河南漯河人, 高级工程师, 博士, 主要从事微器件设计及工艺技术的研发。

因此,本文提出了一种谐振梁为双“W”截面形状的石英音叉谐振元件,与“H”形截面的谐振梁相比,在同等激励电压条件下,双“W”截面谐振梁在凹槽左右两端制作有深凹槽,提高了湿法刻蚀后凹槽侧壁的陡直性,激励电极产生的有效电场强度明显增强,动态阻抗值降低,有利于谐振元件结构的进一步微型化。

1 结构设计

石英音叉谐振元件由一对谐振梁和与谐振梁根部相连的固定端组成,如图 1 所示。谐振梁端部上表面覆盖有电镀工艺制作的金属质量块,其作用是通过激光烧蚀的方式去除部分质量块的质量以精确调节谐振元件的振动频率。谐振梁上、下表面沿长度方向设置有“W”形截面的凹槽,每个凹槽由两侧平行的深凹槽和位于两个深凹槽之间且与两个深凹槽连为一体的浅凹槽构成,在凹槽的侧壁及谐振梁的两侧壁分别覆盖有可连接外部激励电源的电极,其中在单个谐振梁内,两凹槽侧壁电极极性相同,谐振梁两侧壁的极性相同。

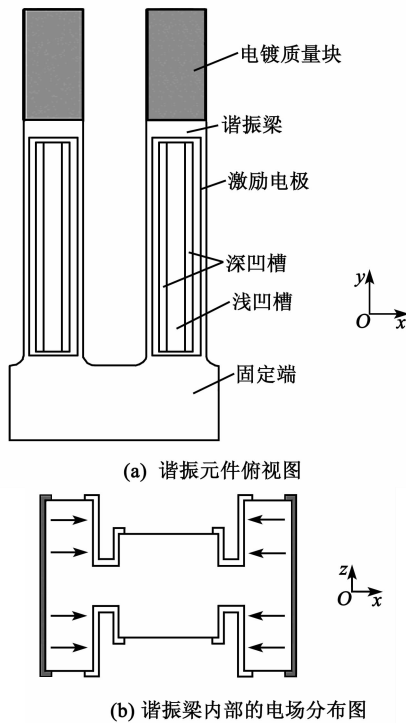


图 1 双“W”形截面梁石英音叉谐振元件

由图 1(b)可见,梁左右两端的电场方向相反,在逆压电效应作用下,梁左右两端产生沿长度方向(y 方向)的应变,且左右应变方向相反,一端为正应变,另一端为负应变,进而带动谐振梁产生沿宽度方向(x 方向)的弯曲变形。两个谐振梁的电极极性设置相反,使得两个谐振梁的弯曲方向相反,对根部的

力和力矩相互抵消,谐振稳定性较好。

2 工艺方案

石英谐振元件的加工工艺流程如图 2 所示。其中,凹槽两端的深凹槽的刻蚀与谐振梁的刻蚀同步实现,未增加工艺步骤及成本。

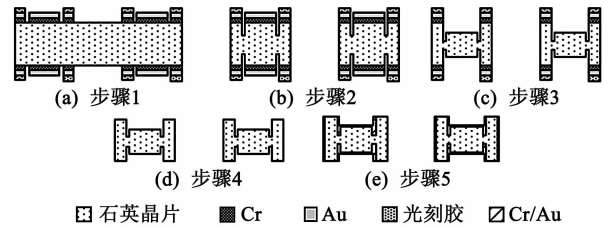


图 2 加工工艺流程

1) 在清洗后的基片双面依次沉积 Cr、Au 金属薄膜作为石英湿法刻蚀时的掩膜,采用光刻工艺进行图形化,而后在金属膜表面旋涂光刻胶并图形化。

2) 石英晶体深槽湿法刻蚀出谐振梁形状,在谐振梁的上下表面刻蚀出两个深凹槽。

3) 腐蚀未被光刻胶保护的 Cr、Au 金属掩膜,并对谐振梁表面进行湿法刻蚀得到凹槽中部的浅凹槽。

4) 依次去除基片表面的光刻胶、Au、Cr 金属薄膜。

5) 石英基片双面溅射 Cr/Au 金属薄膜组合,采用喷涂胶和倾斜曝光的方式对金属薄膜进行图形化制作。

3 仿真分析

谐振梁表面的凹槽沿梁长度方向(晶体 y 方向)设置,其侧壁陡直度主要受 x 方向各晶面刻蚀速度影响。 $-x$ 方向的晶面刻蚀速度较快^[3],侧壁陡直度较好, $+x$ 方向晶面的刻蚀速度较慢,侧壁陡直性较差。 $+x$ 方向经刻蚀后显现的主要晶面如图 3 所示。

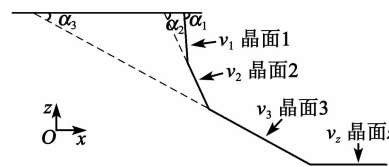


图 3 $+x$ 方向晶面示意图

对比分析矩形、“H”形、双“W”形截面的谐振梁的电场激励效率,为简化计算,假设 $-x$ 方向的凹槽侧壁为垂直,仿真采用的 $+x$ 方向主要晶面的角度及刻蚀速度^[7]如表 1 所示。

表 1 $+x$ 方向晶面角度及刻蚀速度

晶面	角度/ $^{\circ}$	刻蚀速度/ $(\mu\text{m}/\text{h})$
晶面 1	88.48	0.999 6
晶面 2	68.67	3.168 0

续表

晶面	角度/(°)	刻蚀速度/($\mu\text{m}/\text{h}$)
晶面 3	32.48	19.240 0
晶面 z	0	58.900 0

仿真采用的凹槽结构参数如图 4、表 2 所示,其中, l 为凹槽的长度。

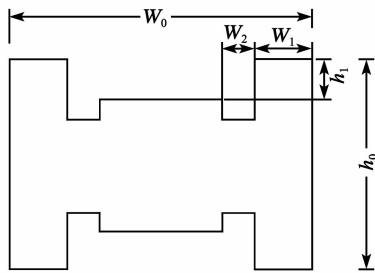


图 4 凹槽截面结构参数

表 2 仿真结构参数

$W_0/\mu\text{m}$	$W_1/\mu\text{m}$	$W_2/\mu\text{m}$	$h_0/\mu\text{m}$	$h_1/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$
100	20	6	100	30	1 200

总的刻蚀时间为晶面 3 刚好被修平,则 3 种截面形状的谐振梁的刚度及变形量的仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同截面形状谐振梁仿真结果对比

截面形状	归一化刚度	归一化变形量
矩形	1	1
“H”形	0.914	5.9
双“W”形	0.887	9.6

谐振梁为矩形、“H”形、双“W”形截面的谐振元件在相同激励电压下产生的压电激励力比值为 1:5.39:8.52。由表 3 可看出,增加了深凹槽后的凹槽侧壁的陡直性,电场的激励效率得到有效提升。

4 性能测试

依据图 2 中的工艺流程在直径 $\varnothing 50\text{ cm}$ 的标准圆片上制作出了石英谐振元件,一半器件为“H”形,另一半器件为双“W”形,其照片如图 5 所示。

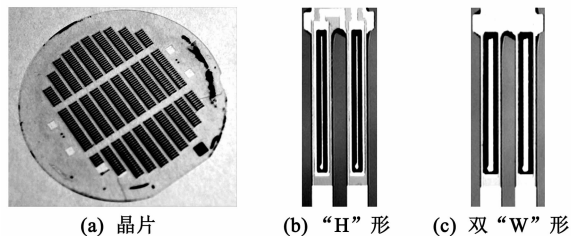


图 5 制作的谐振元件

将制作有谐振元件的晶片固定于特定的测试台上,采用阻抗分析仪对其进行电信号测试,测试结果如表 4 所示。由表可看出,双“W”形截面石英谐振元件的

Q 值和导纳分别由 2 387、2 143 ns 提高至 2 648、2 346 ns,动态阻抗值由 548 k Ω 降至 417 k Ω 。

表 4 测试结果

截面形状	编号	Q 值	导纳/ns	动态阻抗/k Ω
“H”形	1	2 374	2 135	550
	2	2 397	2 160	541
	3	2 389	2 136	554
双“W”形	4	2 665	2 366	414
	5	2 666	2 354	415
	6	2 614	2 318	423

5 结束语

设计了一种谐振梁为双“W”截面形状的石英音叉谐振元件,仿真对比分析了其与“H”形截面的音叉谐振元件的电场激励效率,其压电激励力同比提高约 58%。设计了合理的工艺方案,相对于“H”形截面谐振元件制作工序未增加,依据该方案制作出了“H”形和双“W”形两种截面形状的石英谐振元件。相对于“H”形截面谐振元件,双“W”形截面谐振元件的电场激励效率得到有效提高,Q 值、导纳、动态阻抗等性能均有所提升,更利于器件的微型化。

参考文献:

- [1] 秦自楷. 压电石英晶体[M]. 北京:国防工业出版社, 1980.
- [2] YAMADA A. Resonator element and oscillator; US, 20100219898 A1[P]. 2010-09-02.
- [3] KOMIZO T, NEMOTO S, KOJIMA Y, et al. Evaluation of quartz dry etching profile for the PSM lithography performance[C]//VS: Proceedings of SPIE, 2005.
- [4] RANGSTEN P, HEDLUND C, KATARDJIEV I V, et al. Etch rates of crystallographic planes in Z-cut quartz-experiments and simulation[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1998, 8(1):1-6.
- [5] 张巧云, 林日乐, 谢佳维, 等. 石英微加工技术在微陀螺研制中的应用[J], 压电与声光, 2009, 31(6):788-790. ZHANG Qiaoyun, LIN Rile, XIE Jiawei, et al. Application of quartz micromachining to realization of micro-gyro[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(6):788-790.
- [6] HIRASAWA K. Tuning fork type piezoelectric resonator having a node of common mode vibration in constructed part of base; US, 007759848 B2[P]. 2010-07-20.
- [7] 王浩旭, 谢立强, 吴学忠, 等. 石英湿法腐蚀及侧壁晶棱修平工艺研究[J], 传感技术学报, 2009, 22(12):1713-1716. WANG Hhaoxu, XIE Liqiang, WU Xuezhong, et al. Research on quartz wet etching and flattening process of sidewall arris[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(12):1713-1716.